



Bescheinigung

Herr Professor Dr. Rudolf S c h w a r t e in
Netphen/Deutschland hat eine Patentanmeldung unter der
Bezeichnung

"Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung
der Phasen- und/oder Amplitudeninformation
einer elektromagnetischen Welle"

am 7. Februar 1997 beim Deutschen Patentamt eingereicht
und erklärt, daß er dafür die Innere Priorität der Anmeldung
in der Bundesrepublik Deutschland vom 5. September 1996, Ak-
tenzeichen 196 35 932.5, in Anspruch nimmt.

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue
Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patent-
anmeldung.

Die Anmeldung hat im Deutschen Patentamt vorläufig das
Symbol G 01 J 9/00 der Internationalen Patentklassifika-
tion erhalten.

München, den 16. September 1997
Der Präsident des Deutschen Patentamts
Im Auftrag

W. W. W.
Wenner

Aktenzeichen: 197 04 496.4

**Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung
der Phasen- und/oder Amplitudeninformation
einer elektromagnetischen Welle**

- 5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung der Phasen- und Amplitudeninformation einer elektromagnetischen Welle.

Der Begriff Phase steht hier allgemein für Phasenlaufzeit und für die je nach Signalform ebenfalls verwendete Bezeichnung Laufzeit.

- 10 Im folgenden wird von einer Lichtwelle anstatt von einer elektromagnetischen Welle gesprochen. Dieses bedeutet jedoch keine Einschränkung nur auf den Spektralbereich der sichtbaren elektromagnetischen Wellen, sondern dient lediglich der Vereinfachung.

- Zur Messung von Frequenzkomponenten nach Amplitude und Phase
15 in breitbandigen und hochfrequenten Signalen werden in der elektronischen Meßtechnik und Nachrichtentechnik häufig Phasendetektoren eingesetzt, die das unbekannte Signal mit einer Sinusschwingung multiplizieren bzw. mischen und den Gleichanteil, der bei Vorliegen einer Signalkomponente gleicher Frequenz durch Integration bzw.
20 Tiefpaßfilterung entsteht, bestimmen.

- Dieser Prozeß erzeugt die Korrelationsfunktion des unbekannten Signals mit dem Mischsignal für eine bestimmte, einstellbare relative Phasenlage. Durch Ändern der Mischfrequenz (Wobbeln) kann das unbekannte Signal in seine Spektralanteile zerlegt werden. Durch
25 mindestens 3 Phasenlagen der Mischfrequenz können Gleichanteil, Wechselamplitude und Phase der unbekannten Frequenzkomponente gleicher Frequenz bestimmt werden.

- Die Untersuchung entsprechender optischer Signale, die eine wachsende Bedeutung in der Meßtechnik und Nachrichtentechnik erlangt
30 haben, geschieht heute i.a. über breitbandige Photodetektoren als elektrooptische Wandler mit anschließender elektronischer Meßwertbestimmung - wie zuvor für elektrische Signale beschrieben.

Wegen des hohen Aufwandes werden diese Verfahren und die entsprechenden Meßgeräte meist nur ein- oder zweikanalig ausgeführt. Bei optischen Signalen sind jedoch häufig gleichzeitig sehr viele parallele Kanäle - insbesondere ganze Bildfolgen - mit hohen Frequenzanteilen zu vermessen.

Neben den spektralen Modulationseigenschaften von zweidimensionalen Lichtwellen interessiert zunehmend der schnelle Verlauf der Einhüllenden in Raum und Zeit. Außerdem möchte man schnell und genau 3D-Objekte z.B. über optische Radarverfahren vermessen, was infolge der Lichtgeschwindigkeit der Echosignale sehr schnelle Detektoren im Subnanosekundenbereich erfordert. Zugleich sollten sie als Detektorarray vorliegen, wenn man auf ein zeitraubendes Abscannen der aktiv oder passiv leuchtenden 3D-Objekte verzichten möchte.

In der Offenlegungsschrift DE 44 39 298 A1, von der die vorliegende Erfindung ausgeht, wird eine solche 3D-Kamera vorgeschlagen.

Fig. 10 soll zur Veranschaulichung dieser 3D-Kamera dienen, die auf dem Echolaufzeit- bzw Phasenlaufzeitverfahren beruht. Die von einem modulierten Lichtsender 107 und 103 abgestrahlte und von dem 3D-Objekt 100 reflektierte HF-modulierte Lichtwelle 101 enthält die gesamte Tiefeninformation in der Verzögerung der Phasenfront. Wird die einfallende Lichtwelle in der Empfangsapertur 102 nochmals mit einem zweidimensionalen, optischen Mischer 104 der gleichen Frequenz moduliert, was einem homodynem Misch- oder Demodulationsprozeß entspricht, so entsteht ein stationäres Hochfrequenz-Interferogramm.

Dieses HF-Interferogramm kann mit einer konventionellen CCD-Kamera 105 aufgenommen und mit einer Bildverarbeitung 106 weiterverarbeitet werden. Die Integration des Gleichanteils des Mischproduktes in der CCD-Photoladung entspricht der Bildung der Korrelationsfunktion der beiden Mischsignale. Die abstandsbezogenen Phasenverzögerungen durch die Echolaufzeiten sowie die Amplituden können pixelweise aus drei oder mehr Interferogrammen durch unterschiedliche Phasen der demodulierenden Mischfrequenz, z.B. 0° , 120° und 240°

oder 0° , 90° , 180° und 270° berechnet und somit das 3D-Tiefenbild rekonstruiert werden.

- Der zweidimensionale optische Mischer 103 bzw. 104, der auch als räumlicher Lichtmodulator (Spatial Light Modulator SLM) bezeichnet wird, besteht dabei bspw. aus einer Pockelszelle, die eine Reihe schwerwiegender, in der Literatur beschriebener Nachteile aufweist.

Weitere Realisierungsmöglichkeiten bieten LCD-Fenster, die zwar billig, aber bzgl. der gewünschten Bandbreite um etwa den Faktor 1000 zu niedrig liegen.

- 10 Ebenfalls teuer und aufwendig ist der Einsatz einer sogenannten Mikrokanalplatte, wie sie in Bildverstärkern eingesetzt wird. Durch Modulation der an den Mikrokanälen angelegten Beschleunigungsspannung, die die Sekundärelektronenemission in den Mikrokanälen beeinflusst, kann die Verstärkung moduliert werden.
- 15 Weiterhin wird im Stand der Technik ein Vorschlag eines 2D-Korrelators auf der Basis eines CCD-Photodetektorarrays gemacht: "The Lock-In CCD -Two Dimensional Synchronous Detection of Light" von Spirig, Seitz et. al., veröffentlicht im IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 31, No. 9, Sept. 1995, Seite 1705 - 1708. Dort wird ein Photopixel
- 20 über 4 Transferrates abgefragt, um die Phase sinusmodulierten Lichts zu ermitteln. Pro Sinusperiode werden mit den 4 Transferrates je eine äquidistante Probe entnommen, wodurch sich die Phase leicht berechnen läßt. Dieser Prozeß ist für die aufgezeigten Problemstellungen zu langsam, da das harmonische Lichtsignal zunächst während einer die
- 25 Bandbreite signifikant begrenzenden Abtastdauer aufintegriert wird. Erst dann erfolgt mit der Übernahme der gespeicherten Ladung als Abtastprobe der gewünschte Mischprozeß.

- Der Erfindung liegt daher das technische Problem zugrunde, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung der Phasen- und/oder
- 30 Amplitudeninformation und damit der Einhüllenden einer Lichtwelle anzugeben, die ein einfacheres, breitbandigeres und preisgünstigeres Korrelatorkonzept und über eine vorgebbare Beleuchtung eine schnelle 3D-Objektvermessung ermöglichen.

Das zuvor aufgezeigte technische Problem wird nun durch das Verfahren nach Anspruch 1 sowie durch das photonische Mischelement nach Anspruch 14, durch die Mischelementanordnung nach Anspruch 20 und durch die Vorrichtung nach Anspruch 23 gelöst.

- 5 Das erfindungsgemäße Prinzip basiert auf einer durch die Modulationsphotogatespannung erzeugten Drift und Trennung der durch die Lichtwelle photogenerierten Minoritätsladungsträger im Material unterhalb von mindestens zwei benachbarten lichtempfindlichen Modulationsphotogates. Diese Ladungsträger driften dabei unter dem Einfluß der an den Modulationsphotogates anliegenden Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ und $U_{bm}(t)$ je nach Polarität bzw. Phase zu den mit vorzugsweise der doppelten Gleichspannung U_a und U_b vorgespannten Akkumulationsgates. Die Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ und $U_{bm}(t)$ liegen vorzugsweise komplementär an und setzen sich vorzugsweise aus einer Vorspannung U_0 und der im Gegentakt überlagerten Modulationsspannung $+U_m(t)$ bzw. $-U_m(t)$ zusammen. Die beiden Modulationsphotogates bilden zusammen vorzugsweise eine quadratische Fläche. Ein Pixel mit nur zwei Modulationsphotogates kann auch als Zweifachpixel bezeichnet werden.
- 10
- 15
- 20 Dieses erfindungsgemäße Prinzip setzt den photoelektrischen Quanteneffekt, verursacht durch elektromagnetische Wellen, voraus. Trotzdem wird - ohne daß dies als Einschränkung zu begreifen ist - immer von Lichtwellen gesprochen.

- In der modulationsspannungsabhängigen bzw. phasenabhängigen Drift der photoerzeugten Ladungsträger zur rechten oder zur linken Seite der Modulationsphotogates ("Ladungsschaukel") besteht der eigentliche Misch- bzw. Multiplikationsprozeß. Dabei stellt die Ladungsdifferenz zwischen den so getrennten, unter den Akkumulationsgates gesammelten und an die Ausleseelektronik weitergeleiteten Ladungsträgern unter Berücksichtigung einer Integration in einer vorgegebenen Zeit ein Maß für die Korrelationsfunktion der Einhüllenden des einfallenden modulierten Lichtsignals und der Modulationsspannung $U_m(t)$ dar.
- 25
- 30

Gleichzeitig bleibt die Ladungssumme dieser zu den Akkumulationsgates gedrifteten und weitergeleiteten Ladungsträger von der Stellung der Ladungsschaukel unbeeinflusst und steht als entsprechende Pixelintensität bzw. als Pixelgrauwert zur Verfügung.

- 5 Um die relative Phase oder Zeitverzögerung der einfallenden Lichtwelle zu bestimmen, ist es - wie oben beschrieben - notwendig, drei Messungen für die drei Größen Gleichspannungs- und Wechselspannungsanteil sowie relative Phase durchzuführen. Daher ist eine Ausgestaltung des Pixels des photonischen Mischelementes mit drei lichtempfindlichen Modulationsphotogates möglich, die mit Modulationsphotogatespannungen beaufschlagt werden, die drei verschiedene Phasenverschiebungen zur vom Sender ausgestrahlten Lichtwelle aufweisen.

- 15 Zur Bestimmung der Phase des Empfangssignals an jedem Pixel des photonischen Mischelementes aus den resultierenden Korrelationsamplituden werden zweckmäßiger Weise jedoch vier verschiedene Messungen bei vier verschiedenen Phasen des Mischersignals herangezogen. Dadurch erhält man eine Überbestimmung, durch die das Rauschen entscheidend verringert werden kann.

- 20 Durch die Gegentaktanordnung der Modulationsphotogatespannungen an zwei Modulationsphotogates pro Pixel werden jeweils zwei dieser Messungen gleichzeitig durchgeführt. Daher genügt es bspw. bei einer HF-Modulation, zwei um jeweils 90° verschobene Messungen bei $0^\circ/180^\circ$ wie auch bei $90^\circ/270^\circ$ Phasendifferenz der Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ bzw. $U_{bm}(t)$ gegenüber der Phase des eingestrahlten Lichtes durchzuführen, um die notwendigen vier verschiedenen Meßwerte zu erhalten.

- 30 Besonders bevorzugt ist daher eine Anordnung, bei der das jeweils ein Pixel bildende photonische Mischelement aus vier symmetrisch angeordneten Modulationsphotogates besteht, wobei jeweils zwei sich gegenüberliegende Modulationsphotogates mit Gegentakt- bzw. um 180° phasenverschobenen Modulationsphotogatespannungen beaufschlagt sind, wobei die beiden im Zusammenhang mit dem Zweifachpixel zuvor beschriebenen um jeweils 90° verschobenen Messungen bei

$0^\circ/180^\circ$ wie auch bei $90^\circ/270^\circ$ Phasendifferenz der Modulationsphotogatespannungen in diesem Fall gleichzeitig durchgeführt werden. Ein solches Pixel kann auch als Vierfachpixel bezeichnet werden.

5 Für eine Eichung der Phasenverschiebung der Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ und $U_{bm}(t)$ ist es weiterhin in bevorzugter Weise möglich, einen Teil der vom Sender abgestrahlten Lichtwelle als Referenz direkt auf mindestens einen von mehreren Pixeln einer Anordnung von einer Mehrzahl von photonischen Mischelementen zu richten. Die von diesem direkt bestrahlten Pixel gewonnene Phasen- und
10 Amplitudeninformation kann dann für die Eichung benutzt werden bzw. für eine Justierung der Phasenverschiebung auf einen vorgegebenen Wert verwendet werden.

Umgekehrt kann bei fremderregter unbekannter Modulation der von einem aktiven Objekt abgestrahlten, einfallenden Lichtwelle mit Hilfe
15 mindestens eines photonischen Mischelementes die Lichtwelle mit der bekanntlich hohen Auflösung eines Lock-in-Verstärkers vermessen werden. Dazu bildet das photonische Mischelement zusammen mit einem an die Stelle des Senders tretenden durchstimmbaren Modulationsgenerators einen Phasenregelkreis. Weiterhin findet sowohl
20 bei der Lock-in-Verstärkung der Phase-Lock-Loop für bspw. für eine HF-Modulation als auch der Delay-Lock-Loop für eine digitale Modulation Anwendung.

Für die Vermessung passiver Objekte kann die Modulation des abgestrahlten Lichtes sowie die entsprechende Modulation der
25 Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ bzw. $U_{bm}(t)$ auf verschiedene Weise durchgeführt werden. Zunächst kann eine kontinuierliche HF-Modulation durchgeführt werden, wobei wiederholt in Zeitabständen, die rückwirkend von der Pixelintensivität beeinflusst werden können, die Ladungsdifferenzen und die Ladungssummen zur Auswertung der Phasen- und Amplitudeninformation der Lichtwelle ausgelesen werden.
30

Vorteilhaft ist eine intermittierende Betriebsweise mit pulsförmiger HF-Modulation und Beleuchtung, z.B. um eine störende Hintergrundbeleuchtung jeweils kurzzeitig zu übertreffen. Dabei werden nur

die photoerzeugten Ladungen jeweils während des HF-Impulses integriert und anschließend ausgewertet.

- Bei der Bestimmung insbesondere der Phasen- bzw. Laufzeitinformation von reflektierten Lichtwellen können zur Erhöhung der Phasen- bzw. Laufzeitauflösung die aus der Radartechnik bekannten HF-Impulskompressionsverfahren mit schmalen Korrelationsfunktionen, z.B. die Chirp-Technik eingesetzt werden. Dabei ist sowohl das Modulationssignal des einzelnen photonischen Mischelements als auch die mit vorgegebener Phasenbeziehung beleuchtende Lichtwelle des Senders und somit auch die mit der gesuchten Phasenbeziehung reflektierte Lichtwelle repetierend mit einem Chirp moduliert. Durch die Chirpmodulation werden in geeigneter Weise durch Einfügen einer einstellbaren Verzögerung zwischen der Modulationsphotogatespannung des photonischen Mischelements und des vom Sender abgestrahlten Lichts Mehrfachziele aufgelöst bzw. störende Mehrfachreflexionen einer beleuchteten Szene unterdrückt.

- Als weitere Modulation steht die auch unten beschriebene Pseudo-Rausch-Modulation (Pseudo-Noise(PN)-Modulation) sowohl als Basisband-PN- als auch als HF-PN-Modulation zur Verfügung. Ein Samplingbetrieb mit Abtast- und Haltevorgängen (Sample-and-Hold) bei repetierenden Lichtsignalen ist ein Sonderfall der Mischung und Korrelation mit Nadelimpulsen. Auch hierfür sowie für andere Anwendungen gepulster Modulation kann das erfindungsgemäße photonische Mischelement vorteilhaft eingesetzt werden.

- Die aufgezählten Modulationsarten sind an sich sämtlich aus dem Stand der Technik bekannt.

- Die zu den Akkumulationsgates gedrifteten Ladungen können nun in verschiedener Weise weiterverarbeitet werden. Zum einen kann das photonische Mischelement in CCD-Technologie realisiert sein, wobei dann die Ladungen unterhalb der Akkumulationsgates gesammelt bzw. integriert und anschließend in herkömmlicher Weise bis zur CCD-Auleseschaltung z.B. im Dreiphasen-Schiebetakt verschoben und über eine p- oder n-Diffusion ausgelesen werden.

Zum anderen kann das photonische Mischelement in CMOS-Technologie als Aktivpixelelement mit pixeleigener Auslese- und Signalvorverarbeitungselektronik realisiert sein. Dabei wird praktisch die in der CCD-Technik übliche Ausleseschaltung jeweils beidseitig bis unmittelbar an die Modulationsphotogates herangeführt. Die Akkumulationsgates werden dabei vorzugsweise als gesperrte kapazitätsarme pn-Dioden ausgestaltet und leiten die ankommenden photogenerierten Ladungen vorzugsweise unmittelbar über die Elektroden G_a und G_b an die Pixelauslese- und Signalvorverarbeitungselektronik zur dortigen Speicherung und Verarbeitung weiter.

Im letzteren Fall werden also die beiden Ladungsanteile der Ladungsschaukel kontinuierlich ausgelesen und können z.B. mit einem Ladungsverstärker praktisch rückwirkungsfrei auf je einer nachgeschalteten Kapazität gespeichert werden.

Es ist Stand der Technik, daß vor jeder neuen Messung die beteiligten und aufgeladenen Kapazitäten durch elektronische Reset-Schalter entladen werden und daß zweckmäßig die im Reset-Zustand gemessenen Fehlspannungen zur Korrektur der eigentlichen Meßwerte verwendet werden. Diese Anwendung des pixelweisen rückwirkungsfreien Auslesens hat den Vorteil, daß die gesamte Dynamik des photonischen Mischelementes und somit des Meßverfahrens erheblich gegenüber der Realisierung in CCD-Technologie gesteigert werden kann.

In weiter bevorzugter Weise ist es möglich, die Phasen- und Amplitudeninformation in einer Pixelauslese- und Signalvorverarbeitungselektronik vorzugsweise als On-chip-Integration direkt zu berechnen. Solch ein anwendungsspezifischer optoelektronischer Chip (ASOC) bzw. solch ein Aktiv-Pixel-Sensor (APS) erhöht die Meßrate und ermöglicht eine pixelweise Vorverarbeitung der Phasen und/oder Amplituden.

Ein wichtiger Vorteil der vorliegenden Erfindung liegt darin, daß die Modulation gleichzeitig mit der Ladungserzeugung und -trennung erfolgt. Mit anderen Worten finden die Detektion und die Mischung gleichzeitig und ohne zusätzlich rauschende und bandbegrenzende Zwischenstufen statt. Daher werden die im Stand der Technik unter

anderem auftretenden zeitlichen Driftfehler verhindert, die bei einer zeitlich und räumlich von der Detektion getrennten Modulation und Integration der Ladungen zwangsläufig auftreten und nicht zu unterdrücken sind.

- 5 Ein weiterer Vorteil der vorliegenden Erfindung liegt in der hohen Grenzfrequenz des photonischen Mischelements. Die Grenzfrequenz des Ladungstransfers durch die Gegentakmodulationsspannung ist bezüglich der maximalen Driftlänge oder Transferstrecke, also der
10 Summenlänge der Modulationsphotogates, mit der Grenzfrequenz entsprechender MOS-Transistoren vergleichbar und erreicht somit den GHz-Bereich. Weiterhin werden durch die antisymmetrische Ladungsträgertrennung und -differenzbildung störende Gleichtaktsignale unterdrückt. Jedes nicht mit dem Modulationssignal korrelierende Stör-
15 signal, z.B. die Hintergrundbeleuchtung, wird in der Ladungsdifferenz unterdrückt, was zu einem hohen Signal-zu-Rauschverhältnis führt. Weiterhin tritt nur ein geringes Zeitdriften wegen der Zusammenfassung von Detektion, Mischen sowie Ladungsträgerintegration und -differenzbildung auf dem gleichen Chip auf. Zudem wird eine Zusammenfassung praktisch aller Meßfunktionen innerhalb einer einzi-
20 gen Halbleiterstruktur möglich.

Gegenüber dem Stand der Technik der DE 44 39 298 A1 mit der Verwendung von Pockelszellen als Modulatoren sind nur geringe Modulationsspannungen im 1 statt 1000 Volt-Bereich notwendig. Zudem wird durch eine 2D-Anordnung von erfindungsgemäßen photoni-
25 schen Mischelementen eine große Apertur auf der Empfängerseite gewährleistet.

Für die Bestimmung der Phasen- und/oder Amplitudeninformation ist weiterhin kein kohärentes oder polarisiertes Licht erforderlich. Damit können weitere spezifische Eigenschaften der einfallenden
30 Lichtwellen durch Vorschalten selektierender Filter z.B. bezüglich Polarisation und Wellenlänge des Lichts genutzt werden. Zusätzlich sind eine hohe Empfindlichkeit und ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis durch den Wegfall der nach dem Stand der Technik eingesetzten breitbandigen Photodetektorverstärker und elektronischen Mischer
35 gegeben.